构建单元式多能互补能源基地助力黄河流域清洁发展

张远生[1]练继建[1] 张金良[2] 邢建营[2]
（1. 水利工程仿真与安全国家重点实验室(天津大学)，天津 300072；
2.黄河勘测规划设计研究院有限公司，河南 郑州 450003）

[摘要]：本文提出了基于风、光、水电、抽水储能多能互补的单元式清洁能源构建模式，结合黄河水沙调控体系规划的黑山峡、碛口、古贤三座水利枢纽工程，依托黄河“几”字弯区域丰富的水、风、光、国土、地形资源，以电源端调控实现稳定输出，提出建设风-光-水-抽水储能多能互补的三座清洁能源基地的构想，替代化石能源，实现节水、减排，助力黄河流域生态保护和高质量发展。

[关键词]：“几”字弯区域　高质量发展　多能互补　能源基地
[分类号]：

Build a Unitary Multi-energy Complementary Energy Base to Promote the Clean Development of the Yellow River Basin

ZHANG Yuan-sheng[1] ,LIAN Ji-jian[1], ZHANG Jin-liang[2], XING Jian-ying[2]
(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Yellow River Engineering Consulting Co. Ltd., Zhengzhou 450003, China)

[Abstract]: This paper proposes a unitary clean energy construction model based on the complementary multi-energy of wind, light, hydropower and pumped energy storage, combined with the Heishanxia, Qikou and Guxian water conservancy projects planned by the Yellow River water and sediment regulation system, relying on the Yellow River the rich water, wind, light, land, and terrain resources in the Ω Region are controlled by the power supply to achieve stable output, and the idea of building three clean energy bases with complementary wind, light, water, and pump energy storage is proposed to replace fossil energy, realize water saving and emission reduction, and help the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin.

[Keywords] : Ω Region, high-quality development, multi-energy complementary, energy base

黄河流域是我国的“能源流域”，煤炭、石油、天然气资源丰富，其中煤炭储量占全国一半以上，全国规划的14个煤电基地中有10个分布在黄河流域。大规模煤电的发展，不仅大量消耗水资源，而且造成大量二氧化碳、二氧化硫等温室气体和污染排放。2020年5月，中共中央国务院《关于新时代推进西部大开发形成新格局的指导意见》提出，“加强可再生能源开发利用，开展黄河梯级电站大型储能项目研究，培育一批清洁能源基地。加快风电、光伏发电就地消纳。”对我国西部地区特别是黄河流域能源清洁开发利用指明了方向。

黄河“几”字弯区域是指黄河流经甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西五省区所形成的“几”字弯环抱地带[1]，是黄河流域乃至全国重要的能源产区，但因其

能源产出大部分为化石能源[2]，因此一直存在着高耗水、高污染、高排放等生态环境问题。本文聚焦黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略，遵循《关于新时代推进西部大开发形成新格局的指导意见》，考虑能源开发利用需求和影响剖析能源开发利用现状问题，根据能源开发利用的发展趋势，提出了基于风、光水电、抽水储能多能互补的单元式清洁能源构建设想，建设黄河“几”字弯三座清洁能源基地，以支撑黄河流域高质量发展。

1 黄河“几”字弯区域能源开发利用现状问题

1.1 黄河“几”字弯能源结构现状

由于我国“富煤、贫油、少气”的资源禀赋结构[3]，目前我国能源利用以石化能源为主，数据显示[4]2019 年石化能源利用占 84.7%，属于资源消耗型和环境污染型能源供应，不但不符合可持续发展的理念，而且严重影响到生态环境质量的改善，与建设青山常在、绿水长流、空气常新的美丽中国要求存在差距。这一特点在黄河“几”字弯区域表现尤为突出[5]。

根据黄河“几”字弯涉及省（区）能源生产与消费情况（见表 1-1），各省区 2018 年能源生产总量 183058 万 t 标煤，约占全国能源生产量的 51%。黄河几字弯区域能源生产以原煤、原油等石化能源为主，其中宁夏、内蒙古、山西等省区的石化能源生产达到 90%以上。另外，从各省区能源生产与能源消费总量来看除甘肃、宁夏两省区能源生产小于能源消费外，其余各省区能源生产大于能源消费，即黄河“几”字弯主要省区能源除满足本地区消费外将向省外调度。

表 1-1　黄河“几”字弯涉及省区能源与消费情况表

省（区）	类型	能源总量（万 t 标煤）	能源构成（%）			
			原　煤	原　油	天然气	一次电力及其他能源
甘肃	能源生产	5734	45.1	20.6	0.4	34.0
	能源消费	7538	56.1	16.9	4.9	22.1
宁夏	能源生产	5260	94.50			5.50
	能源消费	6827	87.0	4.9	4.1	4.1
内蒙古	能源生产	54620	90.5	0.3	5.2	3.9
	能源消费	19915	79.9	7.0	2.3	10.8
陕西	能源生产	51542	78.4	9.7	10.5	1.4
	能源消费	12537	74.9	8.6	10.7	5.8
山西	能源生产	65901	97.9	0.0	0.8	1.2
	能源消费	15813				

注：（1）数据来源为各省 2018 年统计年鉴。

（2）2017 年位于黄河“几”字弯区域的鄂尔多斯原煤产量约占内蒙古自治区的 66.5%，天然气产量占内蒙古自治区的 100%。

1.2 黄河“几”字弯区域发展面临的问题

黄河“几”字弯区域是黄河流域最具有地理辨识度的区域，在西部大开发中战略地位举足轻重。该区域资源禀赋相近，产业结构趋同，在区域发展中存在以下几个问题：

（1）资源综合利用不足。作为能源富集区，“几”字弯区域已多源开发煤炭、石油天然气、煤制天然气、电力、成品油、风电和光伏发电等资源，整体化石能

源消费占比较高，水资源较短缺，新能源弃风弃光现象普遍[6]，多种能源未形成合力，区域资源的综合与循环利用有待加强。

（2）电力外送潜力未完全发挥。“几”字弯区域自身电力需求有限，西北电网外送通道输送容量主要受调度机制和新能源发电预测精度等原因限制，区域调峰能力有待提升，外送潜力尚未完全发挥[7]。

（3）生态环境脆弱。黄河“几”字弯区域是黄河“三区一廊道”中黄河生态廊道的重要组成部分，大部分为干旱、半干旱地区，降水稀少，又是黄河泥沙的主要来源区之一[8]，属于典型的生态脆弱区。高温、干旱、大风、沙尘等自然灾害影响，荒漠化和水土流失面积不断增加，生态环境较为脆弱。生态友好型能源开发利用已成为必然。

（4）环境污染问题突出。作为我国重要能源化工基地，资源型产业特征明显。长期的规模化开发，给当地本来就很脆弱的生态系统带来了巨大压力，对大气环境、水环境和土壤环境等都造成了不同程度的污染[9]。新型清洁能源的开发是未来发展的趋势。

2 黄河几字弯区域能源发展趋势

黄河流域生态保护和高质量发展国家发展战略的提出，以及新时代西部大开发新格局的形成，对黄河“几”字弯区域能源发展提出了新要求。弯区能源供给侧结构将持续优化，建设清洁低碳、安全高效的现代能源体系，一直是能源发展改革的重大历史使命。为实现2030年前后中国碳排放达到峰值的目标，落实黄河流域生态保护和高质量发展战略，创建生态文明社会，清洁能源将继续保持高速增长。弯区内水力资源技术开发量为25352.5MW，经济开发量为23510.1MW [10]。弯区内蒙古自治区属于风资源II类区，风能资源丰富；流经甘肃和宁夏的区域属于风能资源III类区，风能资源较丰富，陕西、山西属于风能资源IV区域，具有一定的开发价值。弯区太阳能资源方面，宁夏北部属于太阳能资源一类区，年辐射总量在6680～8400MJ/m²之间，年日照时数在3200h～3300h之间；甘肃中部、内蒙古南部属于太阳能资源二类区域，年辐射总量在5852～6680MJ/m²之间，年日照时数在3000h～3200h之间；陕西、山西从南至北包含了二类、三类、四类区域，年辐射总量在4180～5016MJ/m²之间，年日照时数在3000h～2000h之间。由此可以看出弯区内水力资源未开发量尚有空间，风光资源待开发量丰富，清洁能源开发将持续成为弯区能源增长极[11]。

黄河流域生态保护和高质量发展的重大国家战略提出后，相关学者和机构对此进行了深入思考[12-15]，总的认识是在充分考虑黄河上、中、下游差异性的基础上，以水资源的节约集约利用，推动生态保护和高质量发展。作为我国重要的能源基地，能源开发利用方式的转变为高质量发展提供契机，最近开始的多能分层分区互补、梯级电站储能等能源新技术的研究和初步实践[16-21]为此打下了坚实的基础。

3 黄河“几”字弯多能互补清洁能源基地建设构想

西北地区是我国风能和太阳能资源最为丰富的地区之一，但由于风、光发电系统的随机波动性特点[22]，加上受西北电网负荷水平相对较低、调峰能力不足、外送通道的影响，风、光资源一直得不到充分开发和有效利用。水力发电作为绿色可再生能源，具备良好的调峰能力，但在电调服从水调的情况下，特别是水电装机占电网比例较小情况下，调峰能力受限。抽水蓄能电站作为当前最具规模

化和技术成熟度的储能方式，不但可以增加电网的调峰的反应能力，而且可以提高电网对风、光发电的接纳能力。

基于《黄河流域综合规划》[23]中待开发的“几”字弯区域水利枢纽工程，结合西北地区广袤的荒漠、沙漠、黄土丘陵沟壑区土地资源和丰富的风、光资源，部署区域能源合作机制，实施创新驱动发展战略，推动能源互补技术，打造黑山峡、古贤、碛口三大多能互补清洁能源基地项目。

3.1 水力资源

黄河“几”字弯黑山峡、碛口、古贤 3 座水利枢纽与黄河干流已建的龙羊峡、刘家峡、三门峡、小浪底水利枢纽是 2013 年国务院批复的《黄河流域综合规划》提出的黄河七大骨干水沙调控体系工程，见图 3-1。除具有协调水沙关系、防凌防洪、合理配置水资源、供水等任务外，利用上下游水头差可以产生巨大电能，根据规划黑山峡装机 200 万 kW、碛口装机 180 万 kW、古贤装机 210 万 kW。



图 3-1　黄河几字弯三座拟建水利枢纽位置示意图

3.2 风光及土地资源

黑山峡河段的甘肃省白银市位居甘肃省腹地北陲，腾格里沙漠南缘，地处黄土高原与腾格里沙漠过度地带，地势呈西南高，东北低，最高海拔 3321m，最低海拔 1276m。中卫市地势西南高，东北低，市区平均海拔 1225m，地貌类型分为黄河冲积平原、台地、沙漠、山地与丘陵五大单元。两地均属典型的温带大陆性季风气候，因受沙漠影响，日照充足，年辐射总量在 6680～8400MJ/m^{2}之间，年日照时数约 3300h，属于太阳能资源一类区；同时风能资源较丰富，属于风资源 III 类区。该区域风光资源较丰富，利于风光项目开发。初步预估沿黄两岸风光能源基地占地约 1500km^2，规划装机规模约 2000 万 kW。

碛口河段的陕西省榆林市东部及山西省吕梁市西部具备风光资源的开发利用条件。榆林市地势由西部向东倾斜，西南部平均海拔 1600～1800m，其他各地平均海拔 1000～1200m，是中国日照高值区之一，年平均日照时数 2593～2914h，东北部最高，南部最低。吕梁市地处吕梁山脉中段，地势中间高两翼低，吕梁山脉由北而南纵贯全境，平均海拔在 1000～2000m 之间，地貌分为风沙草滩区、黄土丘陵沟壑区、梁状低山丘陵区三大类，平均日照时数 2351～2871h。两区域属于太阳能资源三类区，风能资源 IV 区域，具有一定的开发价值，适合大

型风光项目开发。初步预估沿黄两岸风光能源基地占地约 2000km²，规划装机规模约 1000 万 kW。

古贤河段沿黄河两岸的陕西延安市东部、山西省临汾市及运城市西部具备风光资源的开发利用条件。延安市位于黄河中游，属黄土高原丘陵沟壑区，地貌以黄土高原、丘陵为主，地势西北高东南低，平均海拔 1200m 左右，属于暖温带半湿润易旱气候区，年日照时数约 2418h。临汾市年平均日照时数为 1748～2512h。运城市地形比较复杂，相对高差明显，最高峰为垣曲境内的舜王坪，海拔 2321.8m；最低处为垣曲县境内的西阳河入黄河处，海拔 180m，全年受季风活动影响，属暖温带大陆性季风气候，日照时长约 2039h。三区域具有平原、山地、丘陵、盆地、台地等多种地貌类型，属于太阳能资源三类区，风能资源 IV 区域，具有一定的开发价值，适合大型风光项目开发。初步预估沿黄两岸风光能源基地占地约 1300km²，规划装机规模约 700 万 kW。

3.3 地形资源

黑山峡河段由峡谷与川地组成，自坝址～峡谷进口长 21km，两岸山势陡峻，冲沟发育，相对高差 300m 以上，从地形和水源保证上具备建设抽水储能电站的条件。参照抽水蓄能电站选址的原则，考虑抽水储能电站调节周期的要求，按上下库水头差大于 300m、距高比不大于 8、最大最小水头比小于 1.25、上水库最大坝高不大于 150m 的原则，在虎峡库区和大柳树库区选择了 5 个站址进行比较，其中 2 个条件较好，初步拟定装机规模 300 万 kW。

碛口水库库区位于晋陕峡谷的上部，属相对隆起的山地高原区，靠近库区 2km 范围内多为海拔 800～1000m 的黄土梁、塬、峁。库区内黄河自北向南流，为本地区最低侵蚀基准面，相对高差在 200m 左右，按抽水蓄能选址原则，适当考虑储能电站调节库容尽量大的原则，在碛口库区左右岸分别选择坝址，初拟装机规模 240 万 kW。

古贤工程区位于晋陕峡谷的南部，属相对隆起的山地高原区，其东侧为吕梁山，西为渭北山地，靠近库区 2km 范围内多为海拔 800～1000 的黄土梁、塬、峁。库区内黄河自北向南流，为本地区最低侵蚀基准面，相对高差在 200～350m 左右，按抽水蓄能选址原则，适当考虑储能电站调节库容尽量大的原则，在古贤库区左岸选择 2 坝址，初拟总装机规模 200 万 kW。

3.4 新型单元式多能互补清洁能源基地

上述水力、风光、储能资源均为清洁能源，分析各能源发电特性，其中风力发电完全依赖于自然风的大小和强弱，光伏电站发电特性受昼夜、季节、天气、温度等影响比较大，风力、光伏电站的出力过程具有明显的间歇性、波动性和随机性的特点；水电站发电机组的出力和发电量随天然径流情况的改变而变化，根据电站入库流量、水库调节性能和水库运行方式，电站具备一定的调节能力；抽水储能电站启动迅速，运行灵活、可靠，具有调峰填谷的作用，调节能力可达 200%，且综合效率高，可达 75%左右。

目前大多数电源均采取先接入电网平台，再由电网按照各电源性质统一调控以匹配目标市场，这种电网调控模式使电源默认被定义优先级，随机性波动性的风光清洁可再生能源接入电网优先级明显低于高耗能高污染的化石能源，由于电网受运营机制限制其调峰能力有限，大量可再生能源无法消纳，西北地区弃风弃光现象一直普遍存在。

将不可调控的风光可再生能源与具有调节性能的水电站以及调节特性更好的抽水储能电站有效组合，构建新型单元式多能互补清洁能源基地，统一整合

提前达到电网多目标要求，符合匹配电网需求的稳定输出，形成电源端调控新型能源基地。依托黄河流域“几”字弯区域丰富的水、光、风、土地、地形资源构建三大单元式多能互补清洁能源基地，内部主要参数及互补类型见表 3-1。

表 3-1　黄河几字弯三大清洁能源多能互补概述表

清洁能源基地名称	水电站（万 kW）	抽水储能（万 kW）	风光电站（万 kW）	能源互补类型
黑山峡	200	300	2000	水、风、光、储能
碛口	180	240	1000	水、风、光、储能
古贤	210	200	700	水、风、光、储能

能源基地充分合理地利用内部各类电源的优越性，整合各种能源型式，采用多种能源互补技术，互相配合运行，综合考虑能源基地发电总量、弃光弃风电量、抽水储能电量、电能出力波动等重要参数，分层分区分时进行能源日、周、月、季、年典型出力平衡，达到降低可再生能源弃用率，提升能源利用率，提高电力目标市场匹配性的互补效果，是目前大型清洁能源基地高效利用、集约发展的先进措施。单元式多能互补清洁能源基地内部设置调度协调中心，如图 3-1 所示，聚合各种能源电量双向调节各种能源输入及输出，优化能源组合方式以满足目标市场电力交易，基地内部具备电力调峰本地化、水量电量调度化、可再生能源储能化、外部市场匹配化。以上功能构建的新型电源模式，充分利用水电站、抽水储能调节性能，即可有效解决能源基地内部风电和光伏不稳定、不可调的缺陷，同时将电网调峰任务本地化，简化电网调度层级，减轻电网调峰压力，解决用电高峰期和低谷期输出不平衡问题，减少弃风弃光弃水问题，促进可再生清洁能源产业持续发展。

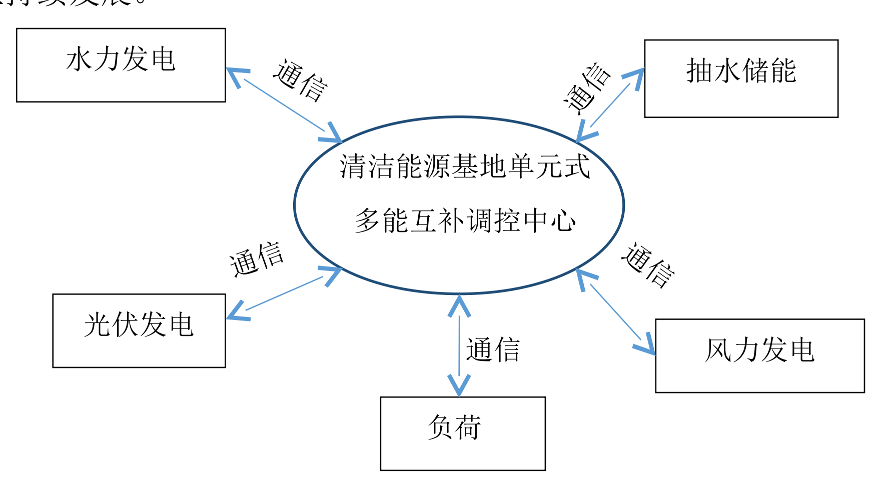


图 3-1 清洁能源基地多能互补结构拓扑图

4 黄河几字弯多能互补清洁能源基地经济性初步分析

以黑三峡单元式多能互补清洁能源基地为代表，分析基地发电成本。按照黑三峡河段水电单位千瓦投资 6000 元、抽水蓄能电站单位千瓦投资 5500 元[7]、光伏电站单位千瓦投资 4000 元、风电单位千瓦投资 7000 元，初步估算黑三峡多能互补清洁能源基地总投资约 1145 亿元。能源基地总成本费用包括折旧费、材料费修理费、工资福利费、保险费、其他费用。按照不同电源结构类似工程成本费用参

数取值和相关经济评价规范要求，估算基地年总成本费用为 66.1 亿元，则单位发电成本为 0.179 元/ kW•h。

考虑西北电网消纳能力有限，拟将基地出力目标电网定位在电力需求紧迫火电占比更高的华中地区河南省。河南电网现状燃煤机组标杆上网电价（脱硫、脱硝、除尘电价）为 0.3779 元/ kW•h，按照过网费 0.08 元/ kW•h，估算黑三峡能源基地上网电价约为 0.30 元/ kW•h，比初步分析黑三峡多能互补能源基地发电成本高 0.121 元/kW•h，由此可见，能源基地存在一定盈利空间。黑三峡多能互补清洁能源基地成本费用分析详见表 4-1。

表 4-1 黑三峡多能互补清洁能源基地成本费用分析

项目	黑三峡河段水电站	抽水蓄能电站	风电	光伏	合计
装机容量（万 kW）	200	300	200	1800	2500
年发电量（亿 kW•h）	69.4	15.9	38.8	244.4	368.5
单位投资（元/ kW）	6000	5500	7000	4000	4580
总投资（亿元）	120	165	140	720	1145
年总成本（亿元）	5.3	7.8	10.1	43.0	66.1
单位发电成本（元/ kW•h）	0.076	0.490	0.260	0.176	0.179

5 黄河“几”字弯多能互补清洁能源基地建设意义

5.1 实现水资源的节约集约利用

建设黄河“几”字弯多能互补清洁能源基地，可降低水资源的消耗，实现水资源的节约集约利用。黄河流域既是能源流域也是缺水流域，上中游地区分布有宁东能源基地、陇东能源基地、鄂尔多斯能源基地、陕北能源基地等，以化石能源为主，耗水规模巨大，现状条件下耗水量接近 10 亿 m^3。建设“几”字弯多能互补清洁能源基地，从总体上改变区域能源产出方式，降低耗水率，提高水资源的利用效率。以现行火电行业（空气冷却）单位发电量取水定额指标 0.53m^3 /MW•h 计算[24]，建设“几”字弯多能互补清洁能源基地每年可节水量 4028 万 m^3 。

5.2 有效减少有害气体排放

建设黄河“几”字弯多能互补清洁能源基地可实现低碳、低污染发展。近年来，我国致力于大气污染治理，重污染天气较大幅度减少，但中部地区包括黄河中游地区仍然面临较大的压力。建设“几”字弯多能互补清洁能源基地，可有效降低二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物、烟尘等大气污染物排放量。根据 2019 年全国火电行业单位电量[25]二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物、烟尘排放量 838 g/ kW•h、 0.187g/ kW•h、0.195g/ kW•h、0.038g/ kW•h 计算，建设“几”字弯多能互补清洁能源基地每年可减少二氧化碳排放约 6367 万 t、减少二氧化硫排放约 1.42 万 t、减少氮氧化物排放约 1.48 万 t、减少烟尘排放约 0.29 万 t。根据近期有偿竞价结果[26]，仅碳汇年效益可达 12 亿元。

5.3 有效利用国土资源助力脱贫攻坚

建设黄河几字弯多能互补清洁能源基地可有效利用我国西北荒漠国土。一方面可降低风电、光电开发建设成本，另一方面农民可从贫瘠的土地收益中持续获益，采取入股分红、就业安置等方式对移民和当地贫困群众进行长期扶持，有效

解决脱贫后的稳定发展问题。

5.4 有助于水土保持涵养水源

在黄河中游地区由于水土流失严重，亟待强化治理。黄河“几”字弯多能互补清洁能源基地建设的成片光伏面板，不但可以转化太阳辐射、调节地区的热力平衡，减少坡面暴雨侵蚀，而且与黄土高原坡面治理相结合，可以集雨促进植物生长，有助于中游地区的水土保持。

6 结论

黄河流域是能源流域，黄河“几”字弯区域更是我国重要的能源产区。应用新型单元式多能互补清洁能源基地建设模式，将不可调控的风光可再生能源与具有调节性能的水电站以及调节特性更好的抽水储能电站有效组合，统一整合提前达到电网多目标要求，符合匹配电网需求的稳定输出，形成电源端调控新型能源基地。依托黄河流域“几”字弯区域丰富的水、光、风、土地、地形资源构建三大单元式多能互补清洁能源基地，不但可以推动黄河流域水资源的节约集约利用和生态环境保护，实现黄河流域高质量发展；而且对加快能源结构调整，促进西部地区由石化能源到清洁能源输出具有重大意义。

参考文献:

[1] 胡正塬. 设立黄河几字湾战略经济区的建议[C]. .中国智库经济观察（2013 年第 2 辑）.:中国国际经济交流中心,2014:148-154.
[2].能源“金三角”发展战略研究[J].中国工程科学,2015,17(09):18-28.
[3] 方圆,张万益,曹佳文,朱龙伟.我国能源资源现状与发展趋势[J].矿产保护与利用,2018(04):34-42+47.
[4] 国家统计局. 中国统计年鉴-2019[M]. 北京：中国统计出版社, 2019.
[5] 吴玉鸣,刘诗洋.能源金三角地区城市耦合协调发展及空间关联性研究[J].生态经济,2020,36(03):78-84+91.
[6] 李新航,饶淑玲.中国弃风弃光问题原因分析及对策与建议[J].上海节能,2019(09):719-723.
[7] 冯黎,王社亮.西北地区发展抽水蓄能电站的意义与面临的主要问题[J].西北水电,2014(02):1-4+7.
[8] 卢书慧,张旭东,张治昊.黄河泥沙基本特性分析及治理措施建议[J].水利建设与管理,2018,38(03):29-32.
[9] 梁晓雪. 我国能源金三角宁东煤化工基地大气细颗粒物的污染特征及来源解析[D].兰州大学,2019.
[10] 李菊根,史立山.我国水力资源概况[J].水力发电,2006(01):3-7.
[11] 中国清洁能源开发量有待大幅提升[J].能源与环境,2020(02):113.
[12] 王金南.黄河流域生态保护和高质量发展战略思考[J].环境保护,2020,48(Z1):18-21.
[13] 张金良.关于构筑黄河流域生态保护和高质量发展水战略根基的思考[J].中国工程咨询,2020(05):68-70.
[14] 张金良.黄河流域生态保护和高质量发展水战略思考[J].人民黄河,2020,42(04):1-6.
[15] 张武丁,王平平.推动黄河流域生态保护和高质量发展[J].环境经济,2020(08):60-63.
[16] 韩晓言,丁理杰,陈刚,刘俊勇,林今.梯级水光蓄互补联合发电关键技术与研究展望[J/OL].电工技术学报:1-11[2020-06-04].https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.191797.
[17] 黄鹤,秦岭,喻洋洋,魏道万.水光多能互补清洁能源智能发电技术[J].分布式能源,2020,5(02):21-26.
[18] 陆建峰,冯俊淇,朱菲菲.用户侧多能互补发展的实践、问题及对策[J].上海节能,2020(03):186-192.
[19] Keyvan Choopani,Reza Effatnejad,Mahdi Hedayati. Coordination of Energy Storage and Wind Power Plant considering Energy and Reserve Market for a Resilience Smart Grid[J]. Journal of Energy Storage,2020,30.
[20] Bilawal A. Bhayo,Hussain H. Al-Kayiem,Syed I.U. Gilani,Firas B. Ismail. Power management optimization of hybrid solar photovoltaic-battery integrated with pumped-hydro-storage system for standalone electricity generation[J]. Energy Conversion and Management,2020,215.
[21] Rituraj Singh Patwal,Nitin Narang. Optimal generation scheduling of pumped storage hydro-thermal system with wind energy sources[J]. Applied Soft Computing Journal,2020,93.
[22] 陈炜,艾欣,吴涛,刘辉.光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J].电力自动化设备,2013,33(02):26-32+39.
[23] 黄河水利委员会.黄河流域综合规划（2012-2030 年）[Z].北京:中华人民共和国水利部,2013.
[24] GB/T 18916.1-2012, 取水定额 第 1 部分：火力发电[S]. 北京：中国标准出版社，2012.
[25] 中国电力企业联合会, 中国电力行业年度发展报告 2020[R], 2020.
[26] 天津排放权交易所. 2019 年度天津市碳排放配额有偿竞价发放结果公告[EB/OL],

http://www.tanpaifang.com/tanjiaoyi/2020/0610/71451.html, 2020-06-10.

通讯作者：张金良 E-mail: zhangjinliang@hebeu.edu.cn;

邢建营 E-mail：xingjy@yrec.cn.